



Les progrès en sélection génomique chez les arbres forestiers

Leopoldo Sanchez

UMR INRAE - ONF BioForA

Biologie intégrée pour la valorisation de la diversité des arbres et de la forêt

Centre Val de Loire (Orléans)

Séance publique Académie d'Agriculture de France

Accélération des programmes d'amélioration des plantes grâce à la génomique

19/01/2022

Une alternative de rupture

Sélection génomique :

Une technologie de rupture pour révolutionner les performances de la prédiction phénotypique

- Apporter une précision compétitive à une sélection très précoce
- Dissocier l'évaluation génétique du phénotypage (à différents moments, sur différents individus)
- Utilisez la puissance de milliers de marqueurs, au lieu des pedigrees (souvent) peu fiables (*)

Réalité disruptive (bénéfique) pour le bovins, et sur un nombre croissant d'autres animaux d'élevage et de cultures

Arbres forestiers utilisés pour l'amélioration :

L'un des taxa en cours de domestication pour lequel la GS pourrait apporter les avantages les plus remarquables, compte tenu de la longueur des cycles, du phénotypage coûteux et lourd, des nouvelles demandes urgentes ...



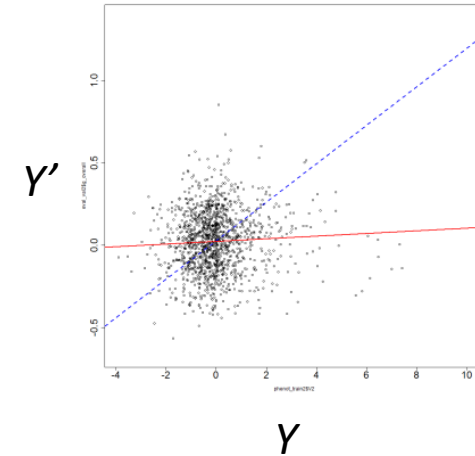
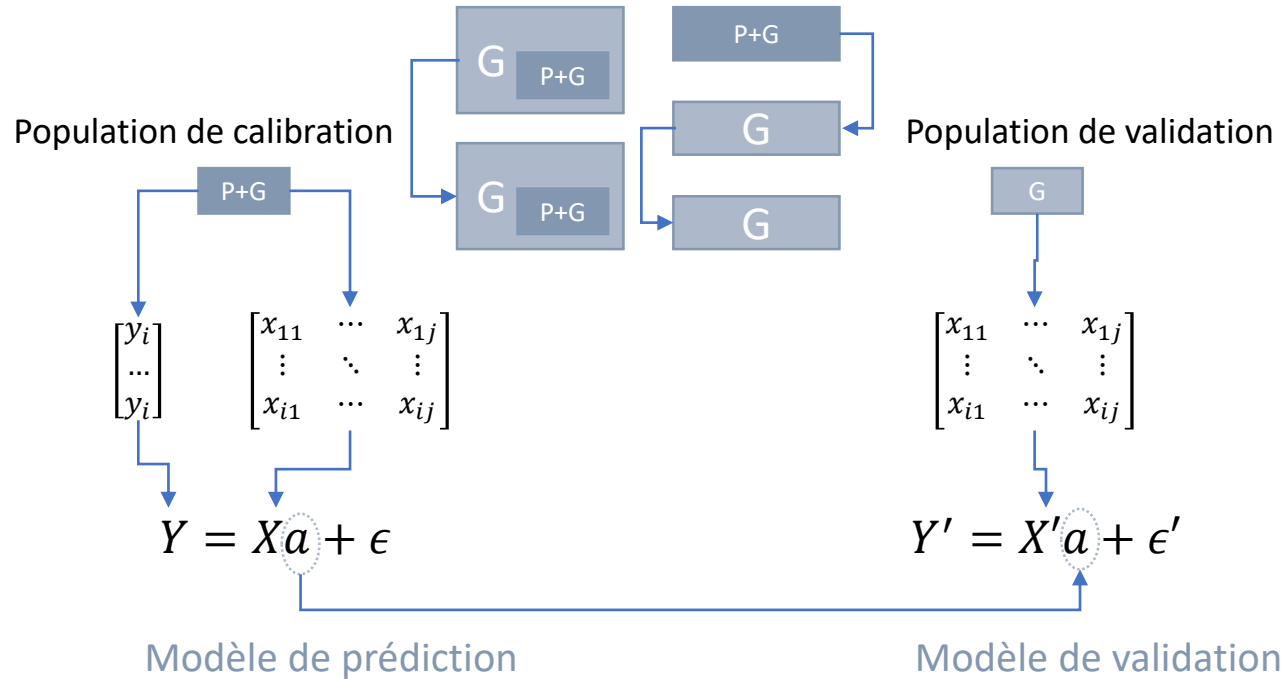
DNA microarray



Share genes : share phenotypes

Principe de la sélection génomique

Principe : basé sur les liens détectés entre génotypes et phénotypes



$$\Delta G = i r \sigma A / L$$

améliorateur $\rightarrow i, r, L$

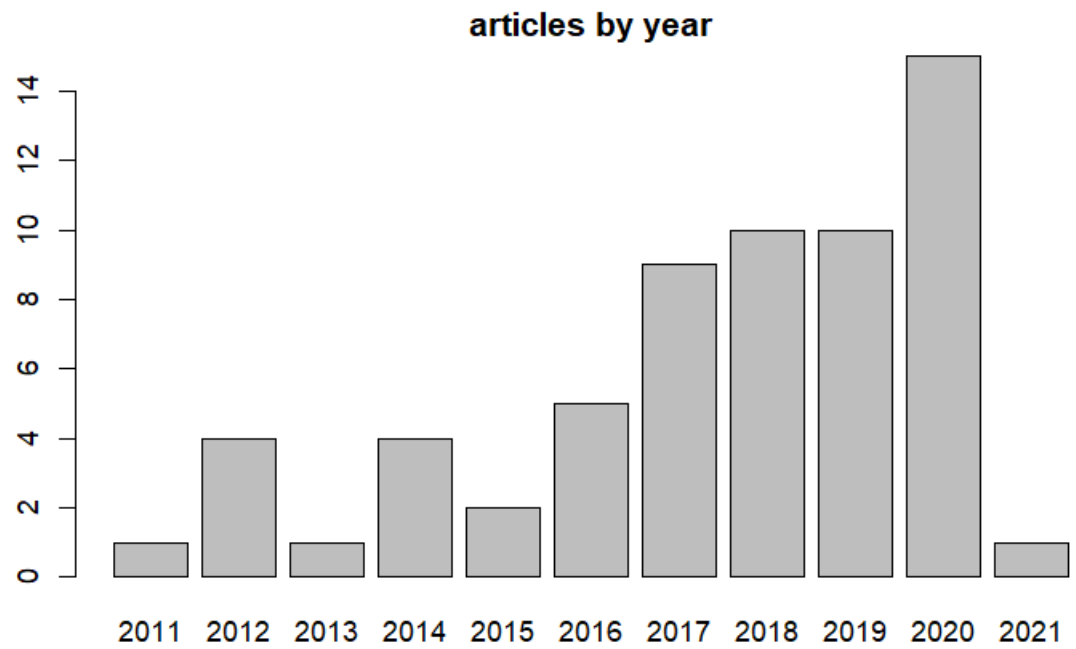
trade-offs $\rightarrow r < > L$

maximizer $r/L [i]$, intégrer plus rapidement des informations (plus) précises $\rightarrow$ GS

Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf		71507	1230 Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer		32036	476 Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf		3800	1470 Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf		30000	30000 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf		2816	167 Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf		15040	1548 Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		33398	999 Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf		40932	995 Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Grattapaglia et al 2011	2011
Eucalyptus hybrids	broadleaf		20090	822 Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf		19506	732 Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf		24806	768 Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf		2023	468 Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf		97000	480 Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf		2919	415 Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf		50000	1250 Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf		107294	435 Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer		116765	1370 Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer		116765	1370 WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer		5660	726 WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer		5660	726 Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer		130269	484 Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		6932	1748 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer		4148	1516 Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		4092	2405 Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2017	2017
Picea hybrids	conifer		62198	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer		7338	1694 Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer		30000	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer		50803	769 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer		4993	734 Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer		56000	498 Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer		19584	1569 Growth & WQ	Ukrainetz and Mansfield 2020	2020
Pinus pinaster	conifer		4332	818 Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer		2500	661 Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer		67168	1103 Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer		8719	694 Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer		7216	923 Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer		4852	926 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer		3461	149 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer		3461	165 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf		92000	473 Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		34000	241 Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		7000	1011 Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		428836	241 Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer		66969	13615 Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1372 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		56454	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

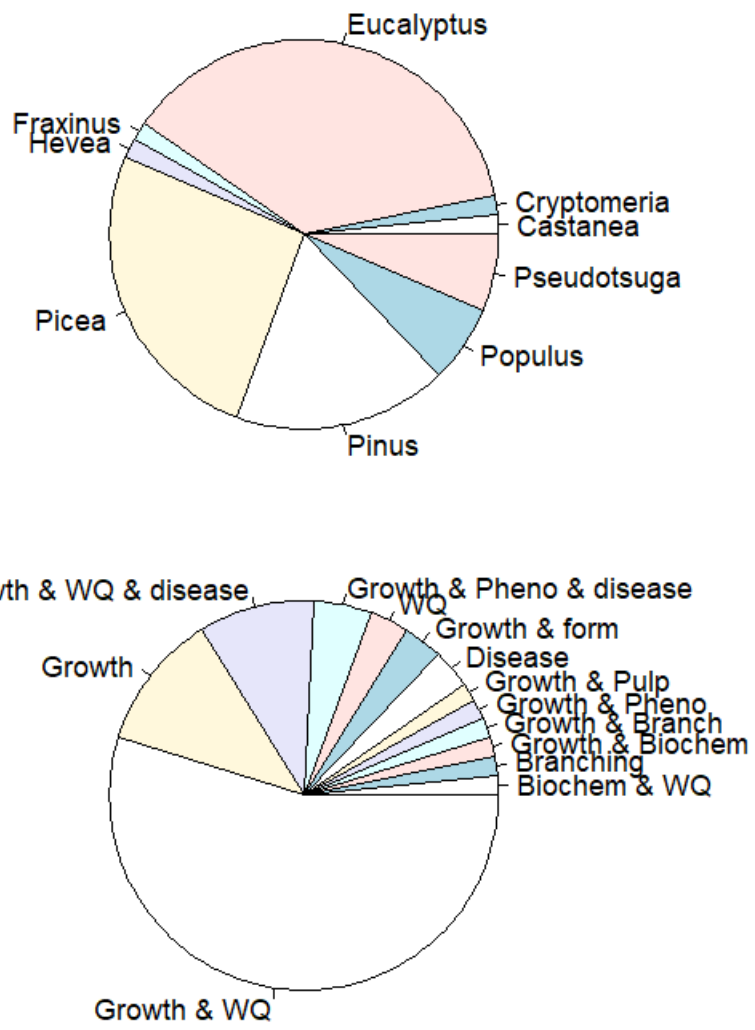
La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?

- 62 études applicatifs entre 2011 et 2020 (2021)
- Compilation non exhaustive, impliquant uniquement des ACL



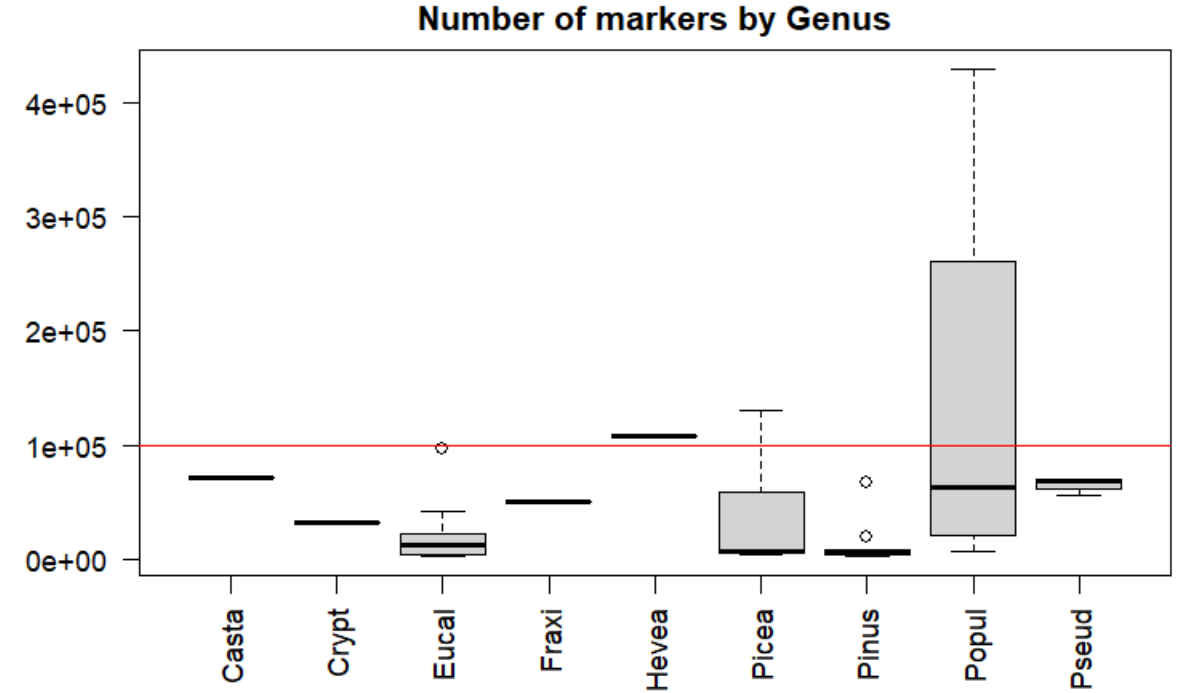
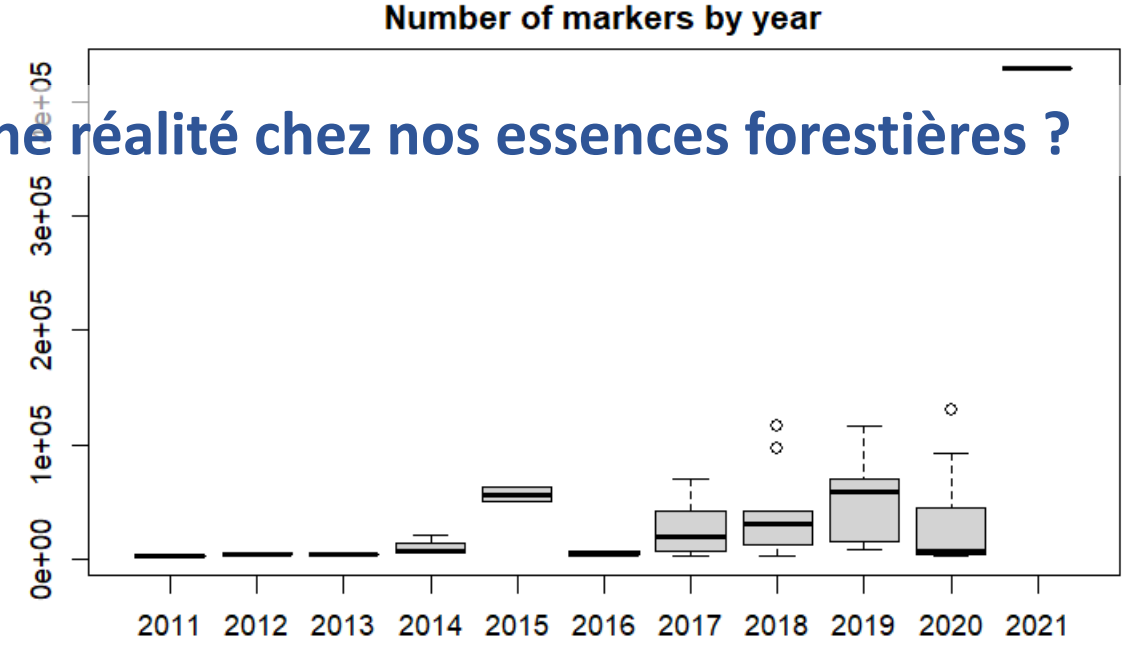
Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf		71507	1230 Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer		32036	476 Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf		3800	1470 Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf		30000	30000 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf		2816	167 Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf		15040	1548 Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		33398	999 Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf		40932	995 Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Grattapaglia et al 2011	2011
Eucalyptus hybrids	broadleaf		20090	822 Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf		19506	732 Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf		24806	768 Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf		2023	468 Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf		97000	480 Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf		2919	415 Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf		50000	1250 Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf		107294	435 Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer		116765	1370 Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer		116765	1370 WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer		5660	726 WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer		5660	726 Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer		130269	484 Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		6932	1748 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer		4148	1516 Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		4092	2405 Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2017	2017
Picea hybrids	conifer		62198	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer		7338	1694 Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer		30000	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer		50803	769 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer		4993	734 Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer		56000	498 Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer		19584	1569 Growth & WQ	Ukrainetz and Mansfield 2020	2020
Pinus pinaster	conifer		4332	818 Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer		2500	661 Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer		67168	1103 Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer		8719	694 Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer		7216	923 Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer		4852	926 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer		3461	149 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer		3461	165 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf		92000	473 Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		34000	241 Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		7000	1011 Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		428836	241 Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer		66969	13615 Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1372 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		56454	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?



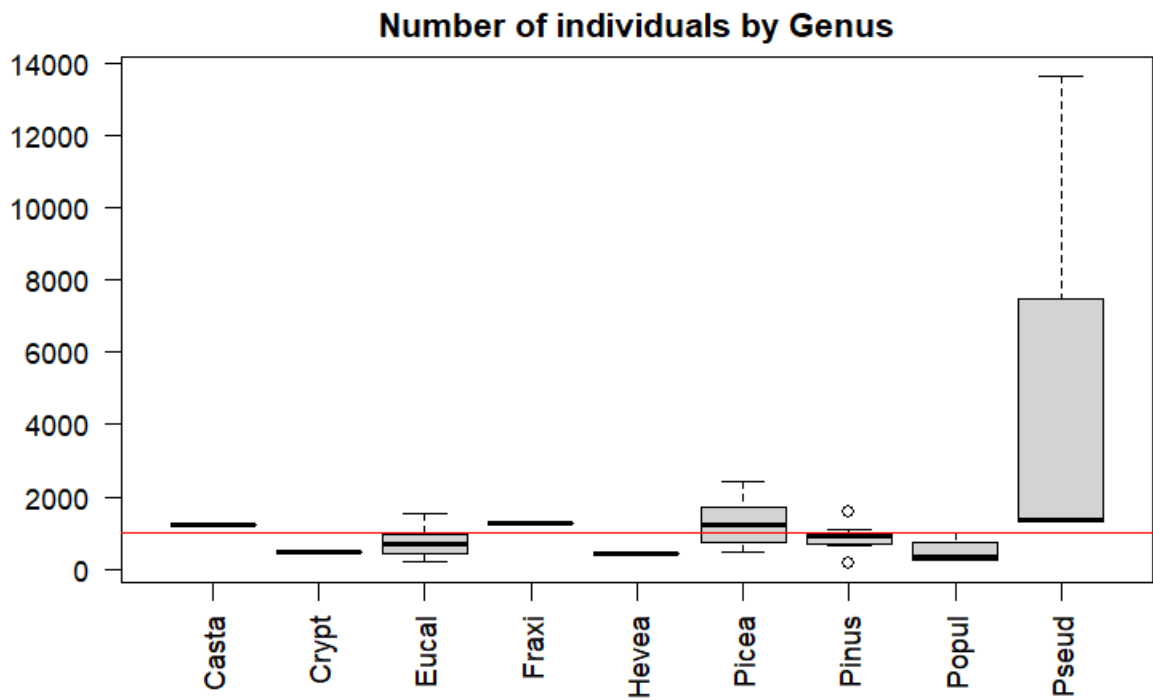
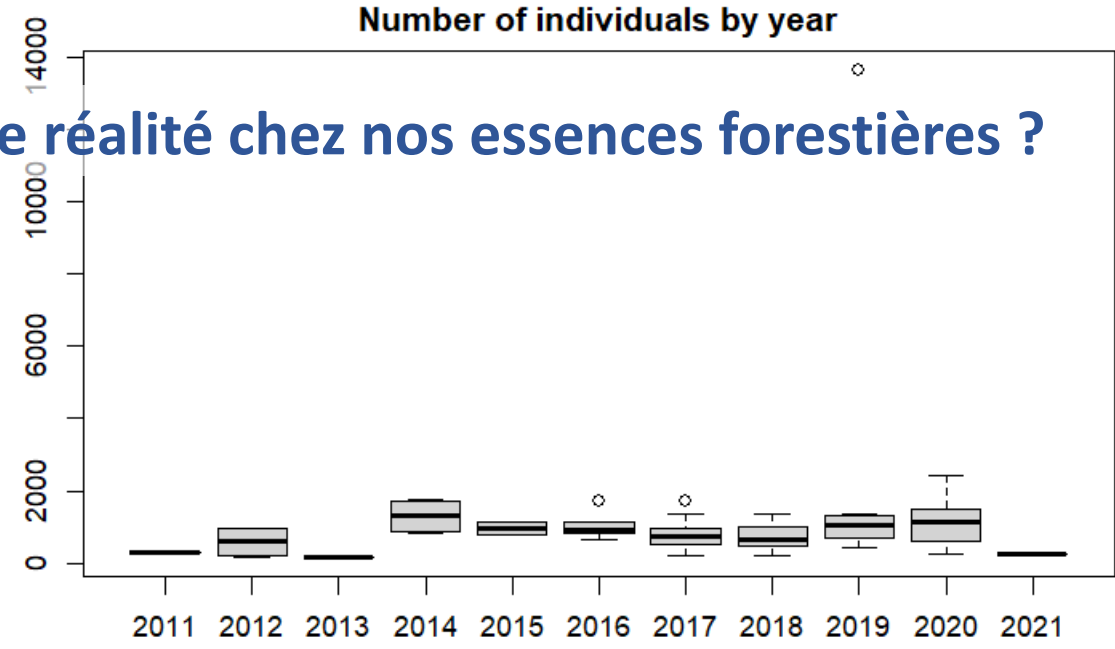
Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf	71507	1230	Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer	32036	476	Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf	3800	1470	Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf	30710	30710	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2816	187	Growth	Cappa et al 2021	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2816	187	Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	33398	999	Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf	40932	995	Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Grattapaglia et al 2011	2011
Eucalyptus hybrids	broadleaf	20090	822	Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf	19506	732	Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf	24806	768	Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf	2023	468	Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf	97000	480	Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf	2919	415	Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf	50000	1250	Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf	107294	435	Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer	116765	1370	Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer	116765	1370	WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer	5660	726	WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer	5660	726	Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer	130269	484	Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	6932	1748	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer	4148	1516	Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	4092	2405	Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2017	2017
Picea hybrids	conifer	62198	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	7338	1694	Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer	30000	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer	50803	769	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer	4993	734	Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer	56000	498	Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer	19584	1569	Growth & WQ	Ukrainetz and Mansfield 2020	2020
Pinus pinaster	conifer	4332	818	Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer	2500	661	Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer	67168	1103	Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer	8719	694	Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer	7216	923	Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer	4852	926	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer	3461	149	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer	3461	165	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf	92000	473	Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	34000	241	Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	7000	1011	Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	428836	241	Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer	66969	13615	Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1372	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	56454	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?



Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf		71507	1230 Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer		32036	476 Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf		3800	1470 Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf		30000	30000 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf		2816	167 Growth	Cappa et al 2021	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf		2816	167 Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf		15040	1548 Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		33398	999 Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf		40932	995 Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Grattapaglia et al 2011	2011
Eucalyptus hybrids	broadleaf		20090	822 Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf		19506	732 Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf		24806	768 Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf		2023	468 Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf		97000	480 Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf		2919	415 Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf		50000	1250 Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf		107294	435 Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer		116765	1370 Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer		116765	1370 WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer		5660	726 WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer		5660	726 Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer		130269	484 Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		6932	1748 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer		4148	1516 Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		4092	2405 Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2017	2017
Picea hybrids	conifer		62198	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer		7338	1694 Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer		30000	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer		50803	769 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer		4993	734 Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer		56000	498 Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer		19584	1569 Growth & WQ	Ukrainetz and Mansfield 2020	2020
Pinus pinaster	conifer		4332	818 Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer		2500	661 Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer		67168	1103 Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer		8719	694 Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer		7216	923 Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer		4852	926 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer		3461	149 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer		3461	165 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf		92000	473 Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		34000	241 Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		7000	1011 Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		428836	241 Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer		66969	13615 Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1372 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		56454	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?



Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf		71507	1230 Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer		32036	476 Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf		3800	1470 Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf		30000	30000 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf		2816	167 Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf		15040	1548 Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		33398	999 Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf		40932	995 Growth & WQ	De Almeida et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Graciano et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		20090	822 Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf		19506	732 Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf		24806	768 Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf		2023	468 Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf		97000	480 Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf		2919	415 Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf		50000	1250 Disease	Stoks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf		107294	435 Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer		116765	1370 Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer		116765	1370 WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer		5660	726 WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer		5660	726 Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer		130269	484 Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		6932	1748 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer		4148	1516 Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		4092	2405 Growth & WQ	Lea et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer		62198	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer		7338	1694 Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer		30000	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer		50803	769 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer		4993	734 Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer		56000	498 Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer		19584	1569 Growth & WQ	Ukmaric et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer		4332	818 Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer		2500	661 Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer		67168	1103 Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer		8719	694 Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer		7216	923 Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer		4852	926 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer		3461	149 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer		3461	165 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf		92000	473 Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		34000	241 Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		7000	1011 Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		428836	241 Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer		66969	13615 Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1372 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		56454	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?

Conclusions générales review

• Les précisions de prédiction sont compétitives, égalant ou dépassant celles obtenues précédemment avec un système traditionnel

• Certains des principaux facteurs qui déterminent les précisions sont la « proximité » entre les pools de calibration et de validation : en termes d'apparentement, d'environnement d'essai s'il existe des interactions GxE, et de différences d'âge à âge

• Les méthodologies d'évaluation ont en général peu ou pas d'impact sur les résultats. Globalement, le rr-BLUP (ou le G-BLUP), plus simple, est le plus efficace.

• La sélection génomique a été principalement appliquée en échantillonnant dans les structures d'évaluation existantes de tests de descendance et clonaux, et en utilisant la diversité disponible.

Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf		71507	1230 Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer		32036	476 Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf		3800	1470 Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf		14442	646 Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf		3000	3000 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf		2816	167 Growth	Cappa et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf		2816	167 Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf		15040	1548 Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3303	1130 Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf		33398	999 Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf		40932	995 Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Graciano et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		20090	822 Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf		19506	732 Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		3129	275 Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf		24806	768 Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf		41304	958 Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf		12236	691 Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus pellita	broadleaf		2023	468 Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf		97000	480 Growth & Biochem	Kainer et al 2019	2019
Eucalyptus robusta	broadleaf		2919	415 Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2016	2016
Fraxinus excelsior	broadleaf		50000	1250 Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf		107294	435 Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer		116765	1370 Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer		116765	1370 WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer		5660	726 WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer		5660	726 Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer		130269	484 Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		6932	1748 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer		4148	1516 Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer		4092	2405 Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer		6932	1694 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer		62198	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer		7338	1694 Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer		30000	1126 Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer		50803	769 Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer		4993	734 Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer		56000	498 Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer		19584	1569 Growth & WQ	Ukrainetz and Moushki 2020	2020
Pinus pinaster	conifer		4332	818 Growth & form	Bartholomeus et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer		2500	661 Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer		67168	1103 Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer		8719	694 Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer		7216	923 Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer		4852	951 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer		4852	926 Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer		3461	149 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer		3461	165 Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf		92000	473 Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		34000	241 Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		7000	1011 Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf		428836	241 Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer		66969	13615 Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1372 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer		69551	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer		56454	1321 Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?

Conclusions générales review

La plupart des études correspondent à des approches de « preuve de concept » plutôt qu'à des applications opérationnelles (pas forcément reprises dans les revues scientifiques), l'eucalyptus et Picea pourraient constituer des exceptions.

Gain de temps ? Oui, mais pas toujours (maturité sexuelle)

Gain de précision ? Plutôt oui

Gain d'intensité de sélection ? Oui, mais pas encore assez de récurrence opérationnelle

Nombre de groupes de recherche assez réduit, des groupes spécialisés dans 1 ou plusieurs espèces taxonomiquement proches (Canada, Brésil, Europe, ...)

The big picture of GS in Europe

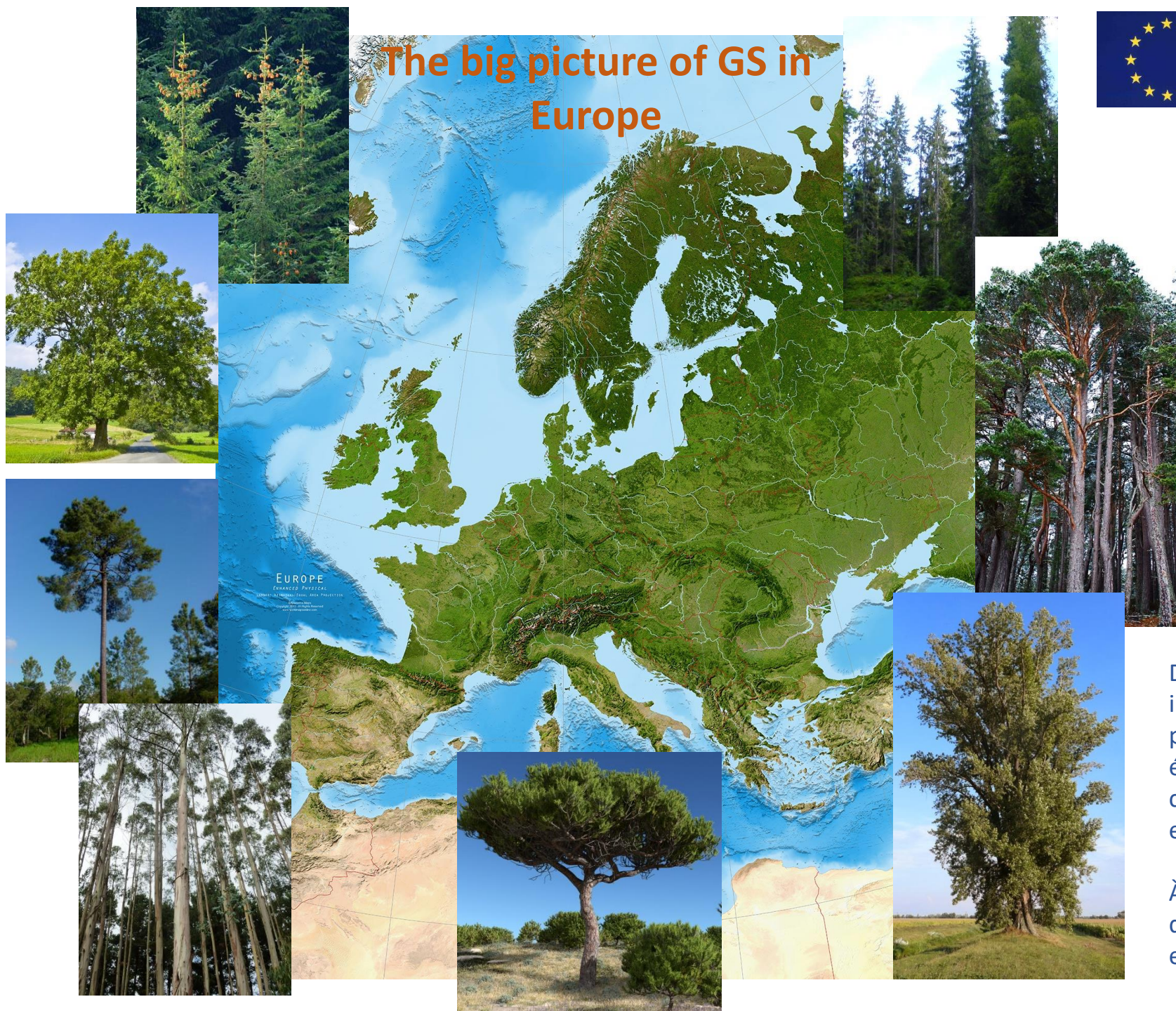


"Increase forest survival, health, resilience and productivity under climate change and natural disturbances, while maintaining genetic diversity and key ecological functions"

2018-2022
19 partenaires
8 espèces

Derrière l'ensemble des essences forestières, il y a une réalité très hétérogène, avec des programmes de sélection, un contexte socio-économique et des connaissances et contraintes biologiques très différents entre espèces.

À cette réalité s'ajoute un ratio typiquement défavorable de nombre de chercheurs par espèce.



Focus sur deux espèces en France

Pin maritime



Peuplier



Environnement et ses changements

ENVIRonmics

Prédiction génomique

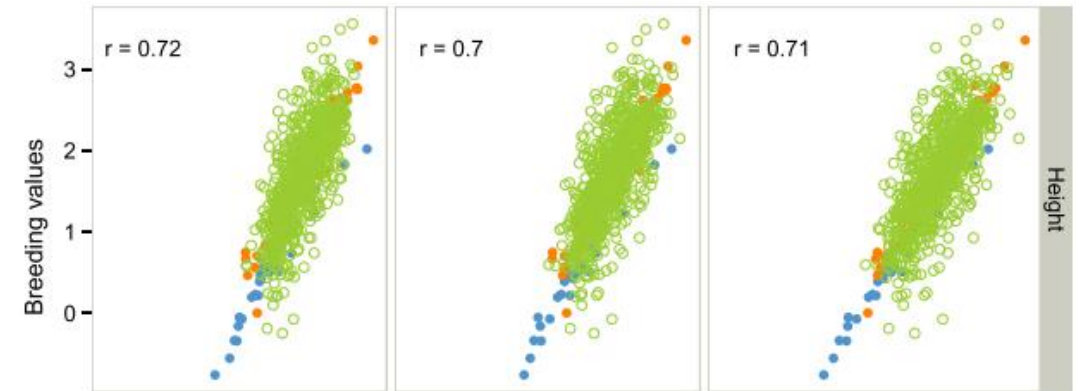
genOMICS

Génome et son fonctionnement



Focus sur Pin maritime

- Début dans les années **1960** et géré par le GIS Pin Maritime du Futur
- Schéma de **sélection récurrente** (3eme génération)
- Estimation des **valeurs génétiques** à partir du **pedigree**
- Variétés améliorées en termes de
 - **Croissance** (hauteur, circonférence, rectitude)
 - **Adaptation** au milieu
 - **Qualité** du bois

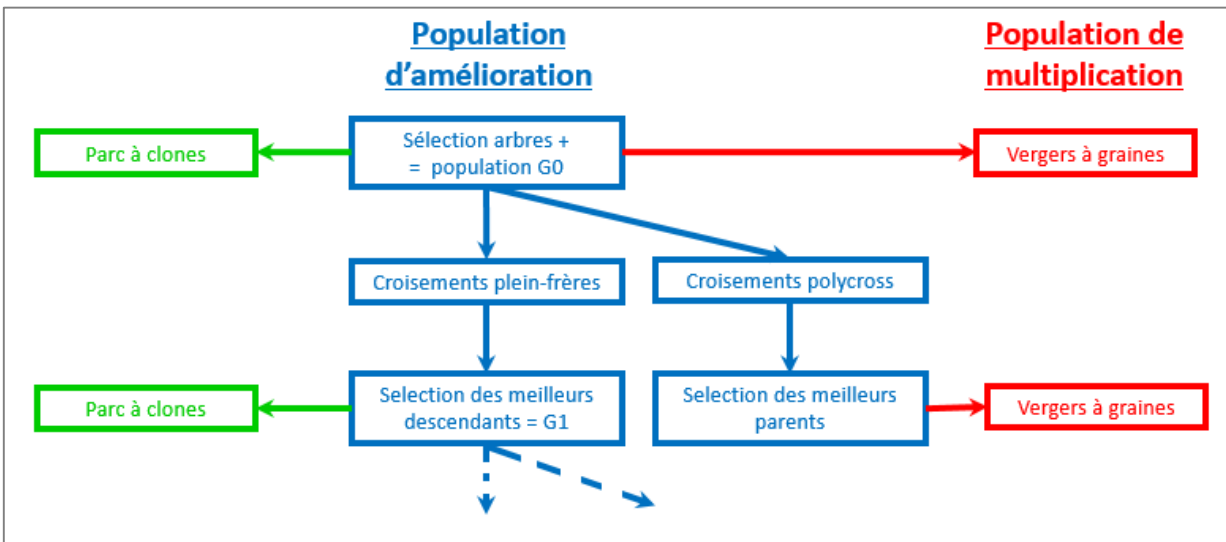


Bartholomé et al. BMC Genomics (2016) 17:604
DOI 10.1186/s12864-016-2879-8

Réduire la durée des cycles de sélection

Intrégrer des caractères complexes

Augmenter l'intensité de sélection



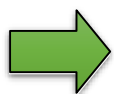
Initiatives « *preuve de concept* » (Bartholome et al 2016, Isik et al 2016) :

- L'évaluation génomique atteint des performances similaires à celles de l'évaluation pedigree
- Cadre expérimental basé sur plan factoriel, avec peu de place pour la sélection intra-familiale
- Couverture faible des puces de génotypage disponibles à l'époque (<5000)

Intégration de caractères - fonction en sélection génomique

Sélection génomique souvent basée sur des caractères ponctuels de production
(Hauteur, Volume, Rectitude)

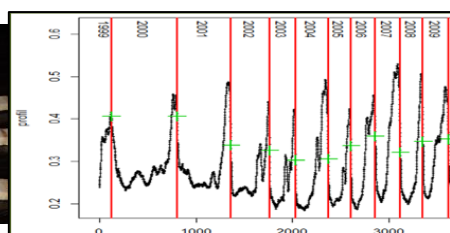
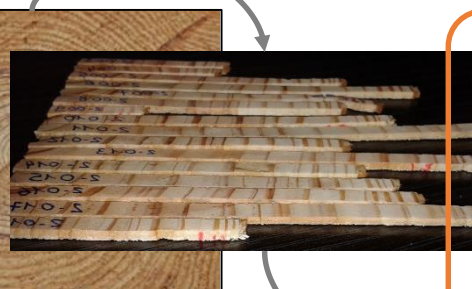
- Données très intégratrices, sans prise en compte de l'environnement
- Contexte evolution rapide des conditions climatiques



Modéliser et prédire les capacités d'adaptation du pin maritime

Carottage de bois et analyses radiographiques

Bois : marqueur rétrospectif de la croissance de l'arbre et de l'activité cambiale au cours des années



Données phénotypiques

Données génétiques
(pedigrees, génotypage)

Variable index
(âge, indice environm.)

Normes de réactions avec des modèles de régression aléatoire

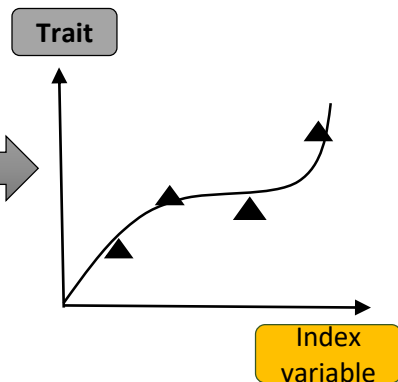
- ✓ Traits très explicatifs
- ✓ Prédictions de la réaction d'arbres dans des environnements non-observés



Random
Regression



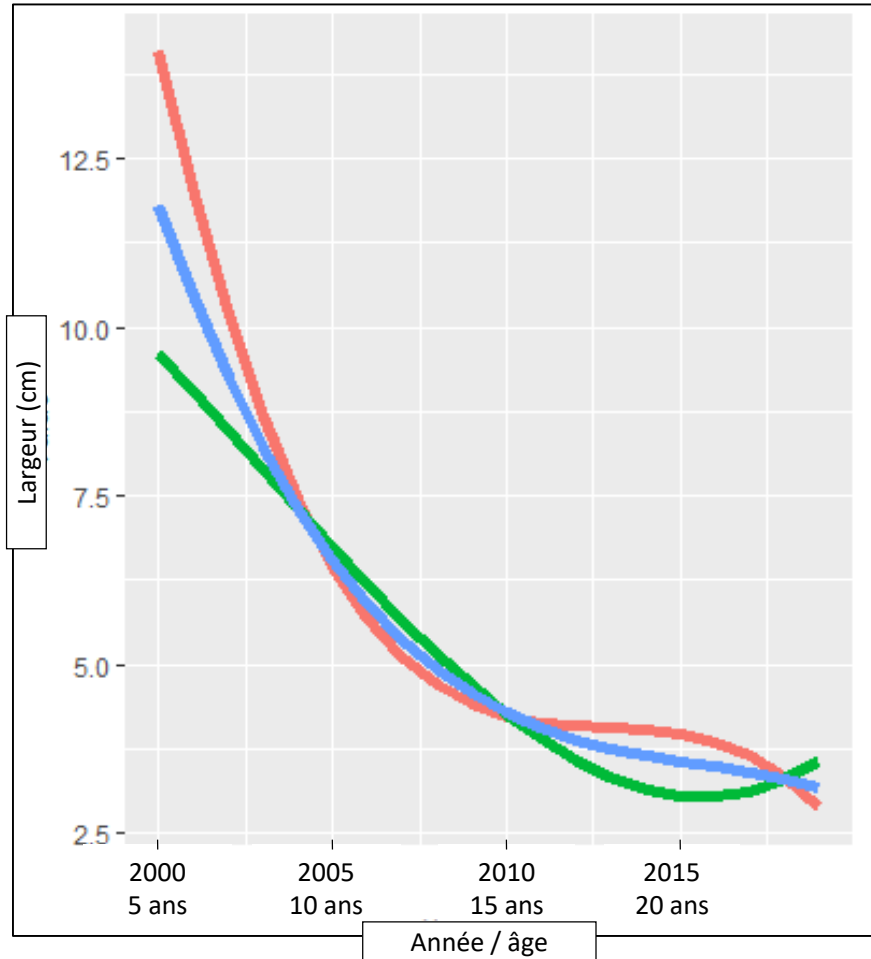
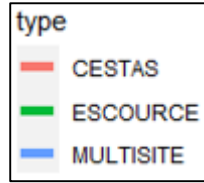
Approche trait-fonction



Thèse Victor Papin (2020-2023)
UMR BIOFORA – UMR BIOGECO

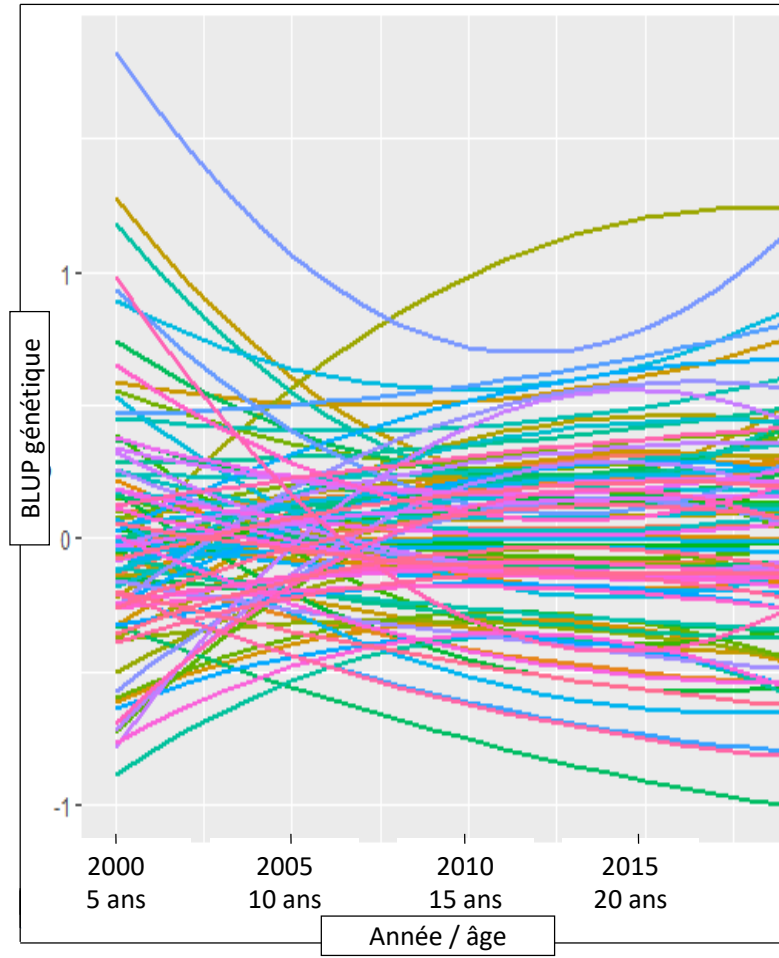
Modélisation : Largeur en fonction année

Partie FIXE :
trajectoires moyennes

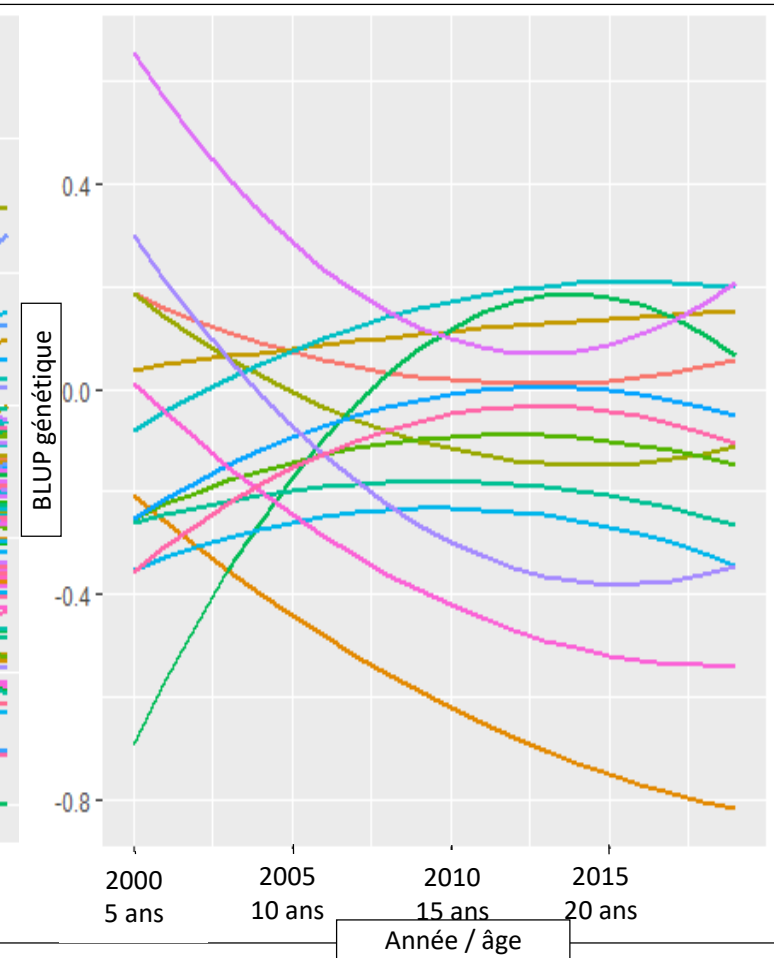


Partie ALEATOIRE : trajectoires parties génétiques additives

Trajectoires individuelles

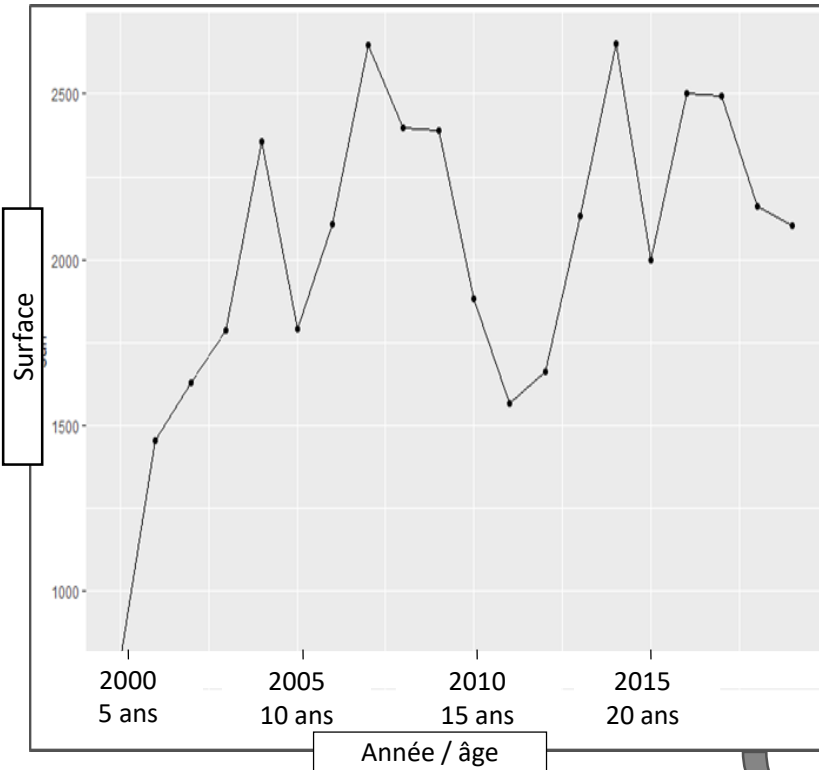


Trajectoires par famille

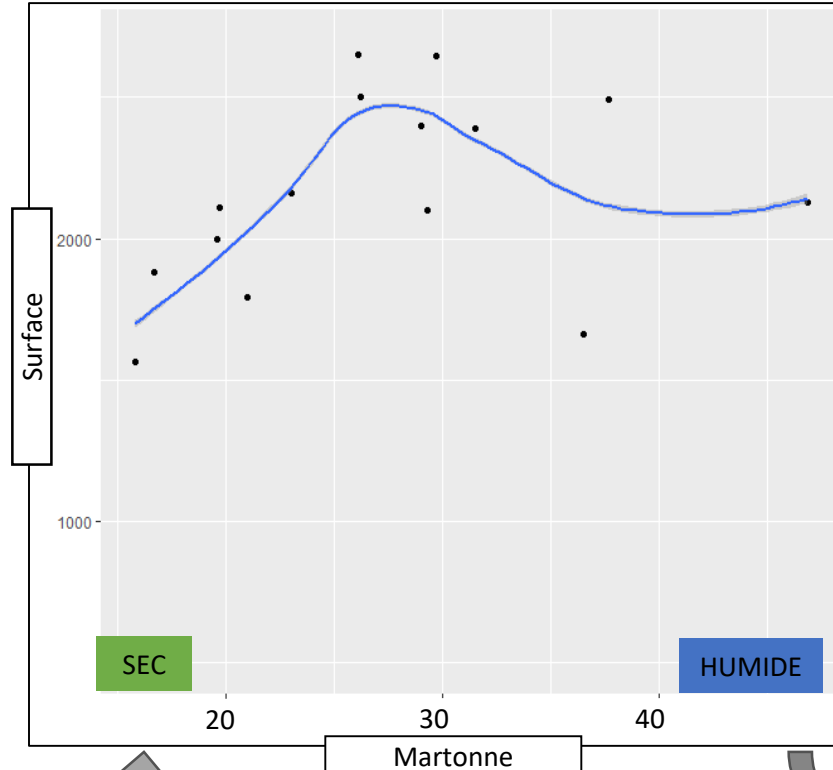


Modélisation : Surface en fonction de l'aridité annuelle

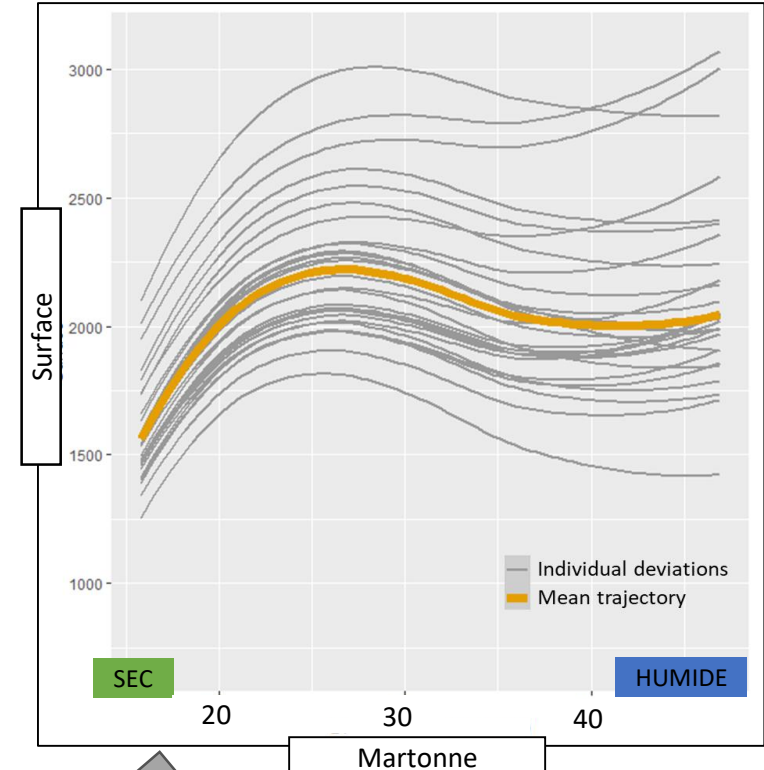
Evolution des surfaces de cernes en fonction de l'année



Evolution des surfaces de cernes selon indice de sécheresse



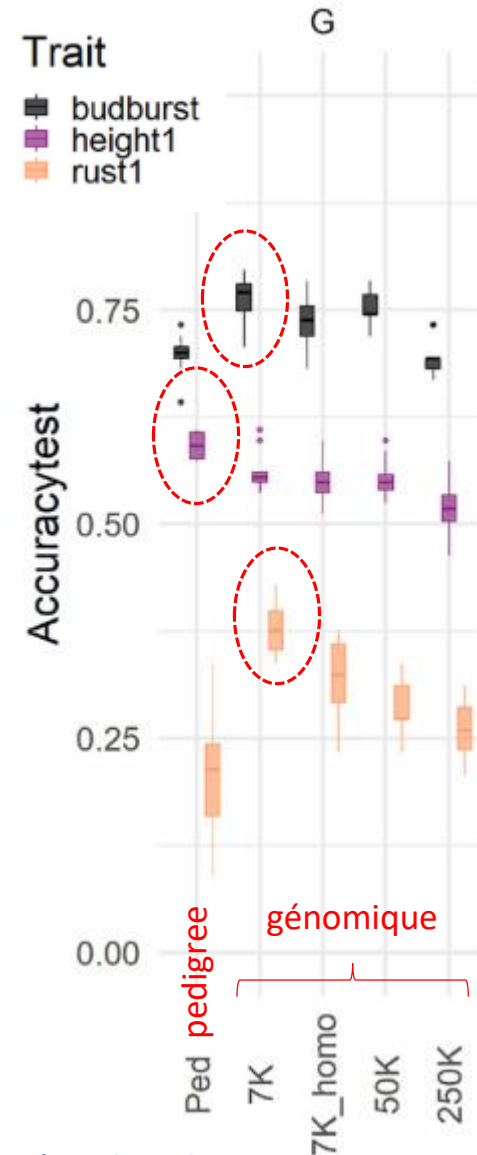
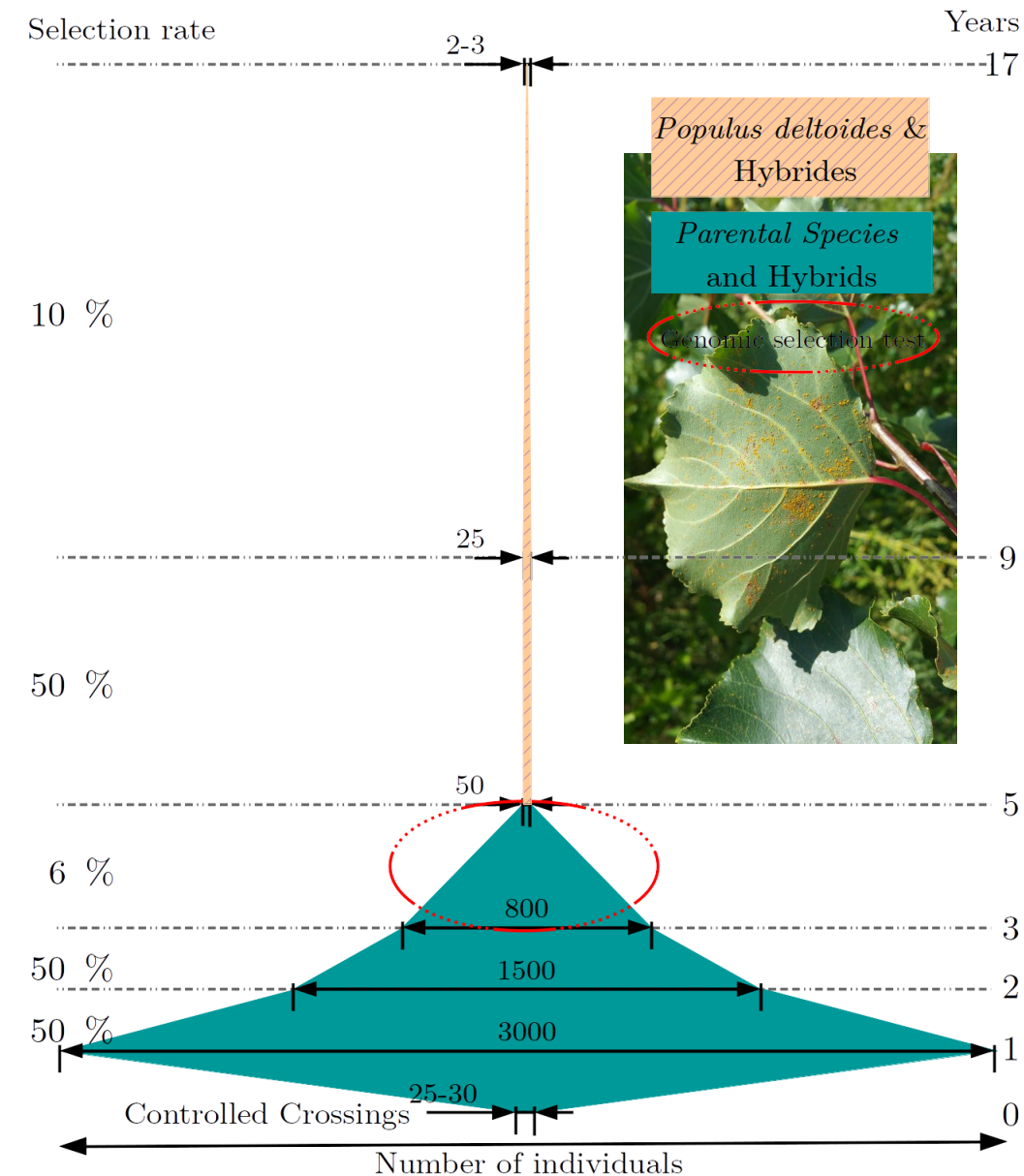
Modélisation par Random Regression



Ré-organisation

Modélisation

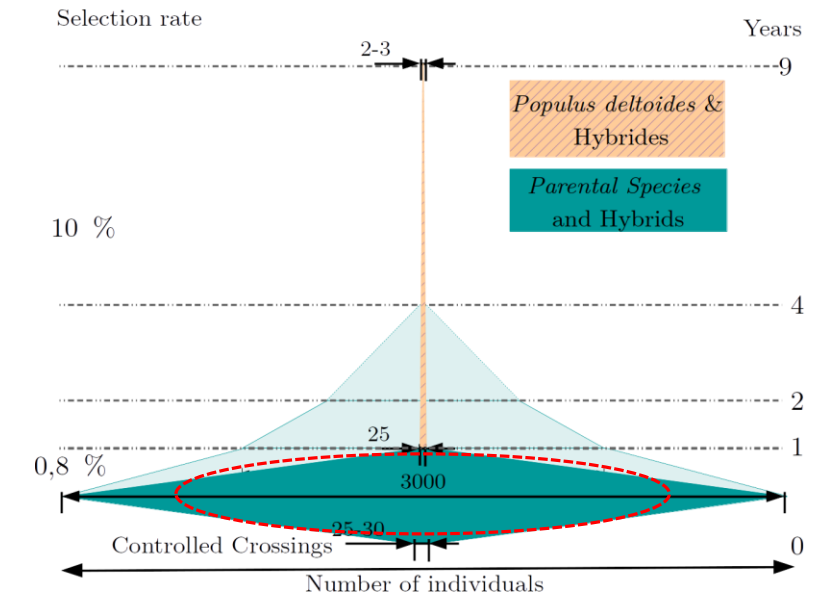
Focus sur peuplier



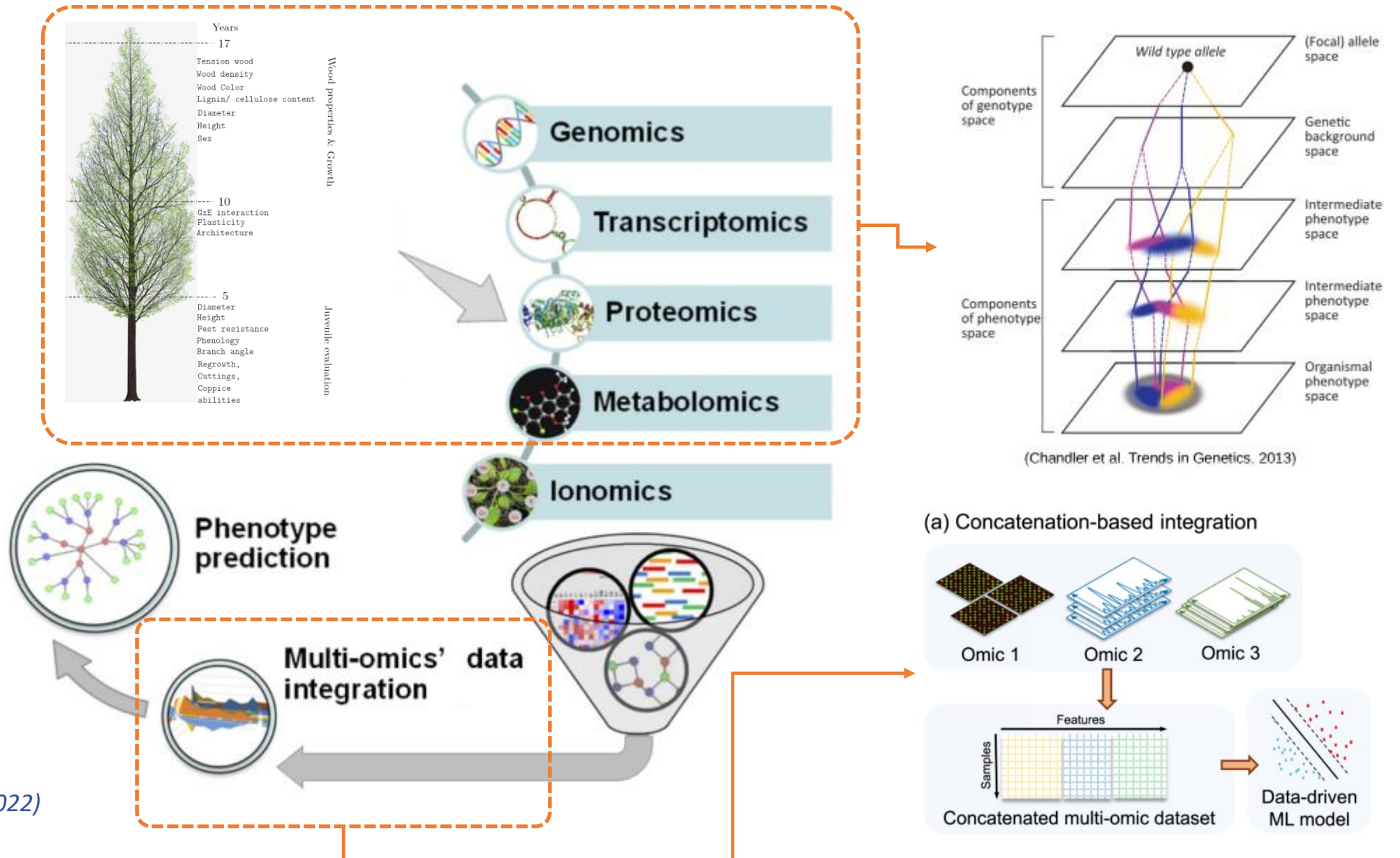
Pégard et al 2020
doi: 10.3389/fpls.2020.581954

Les avantages de la SG dépendent du contexte :

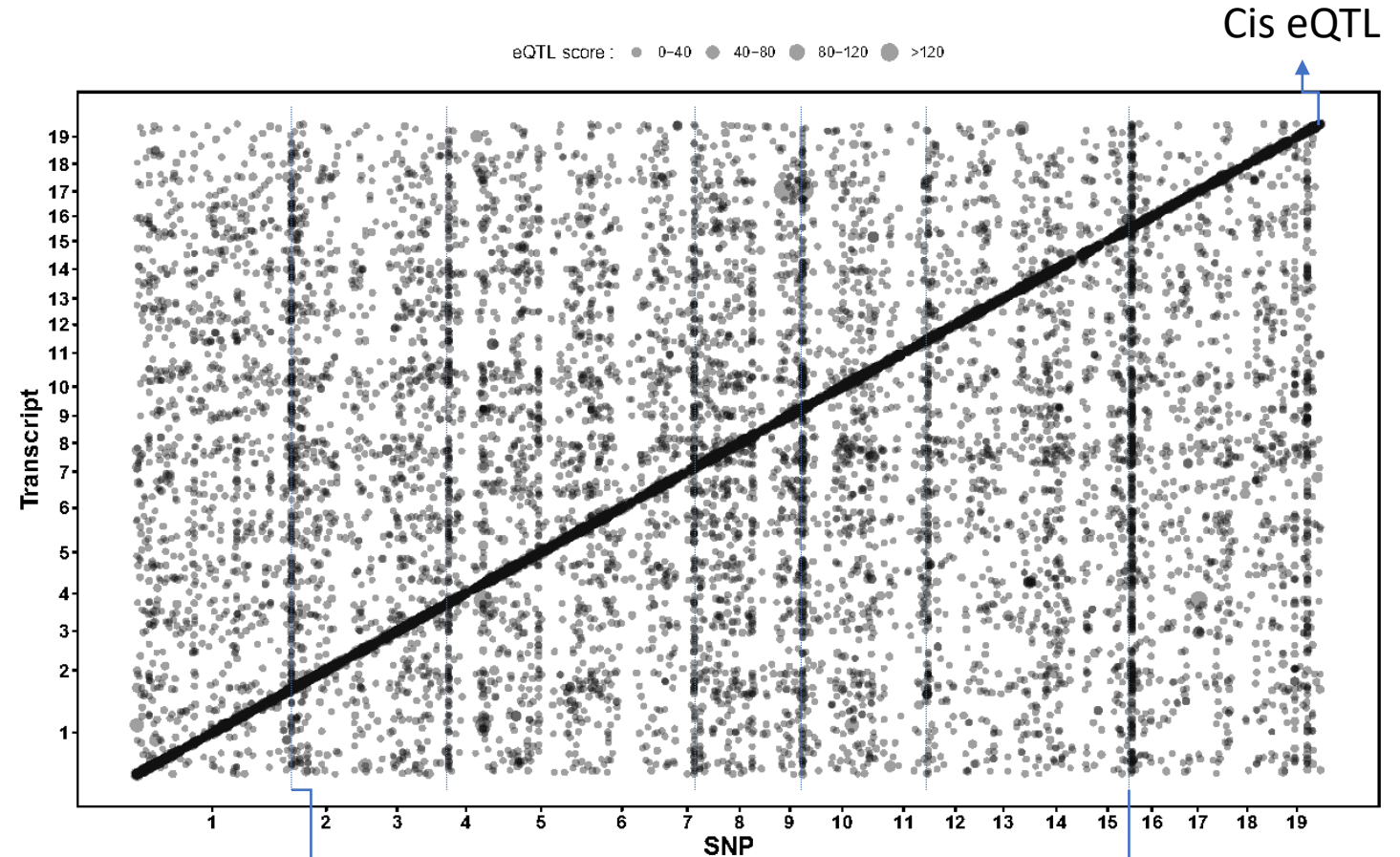
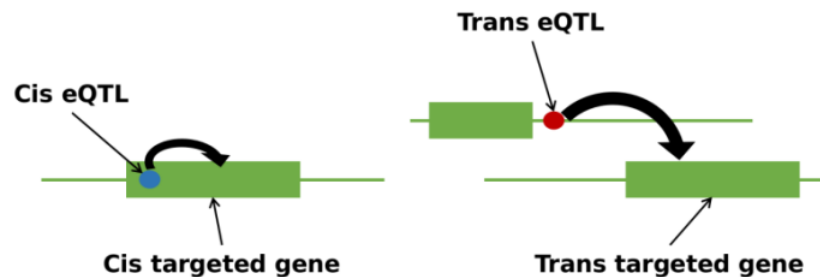
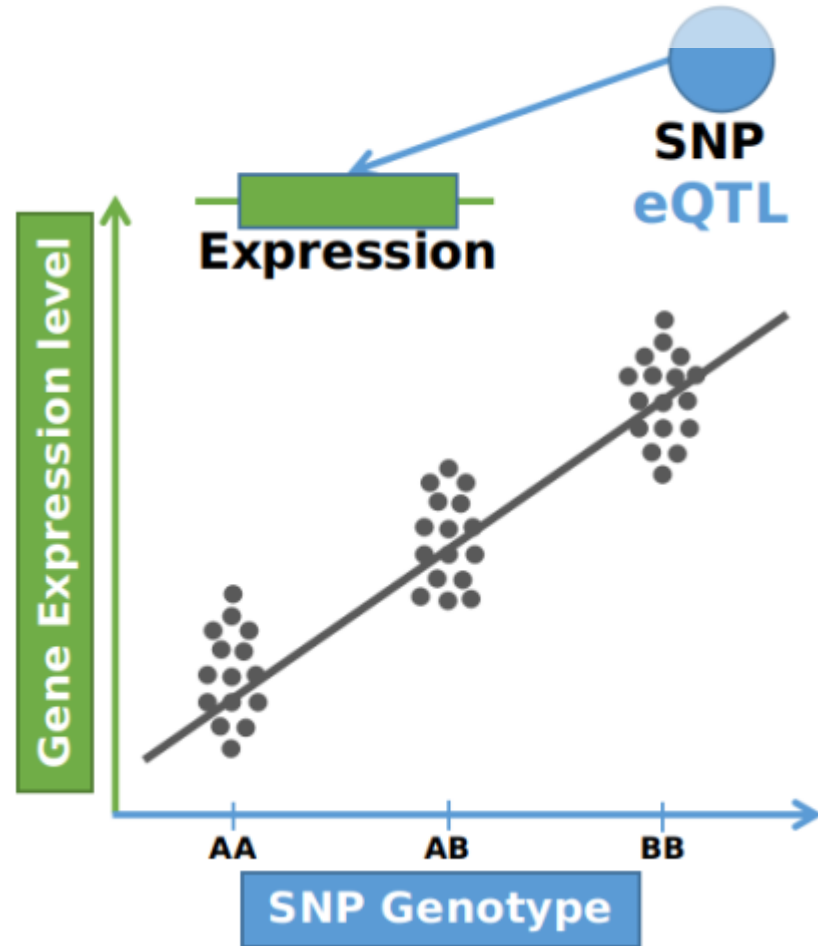
- Ses performances sont comparables à celles du pedigree en conditions standard.
- La SG s'est avérée avantageuse dans des scénarios moins standard.
- La SG, une option pour la sélection précoce, où la précision de la sélection est généralement faible et la variabilité génétique abondante.

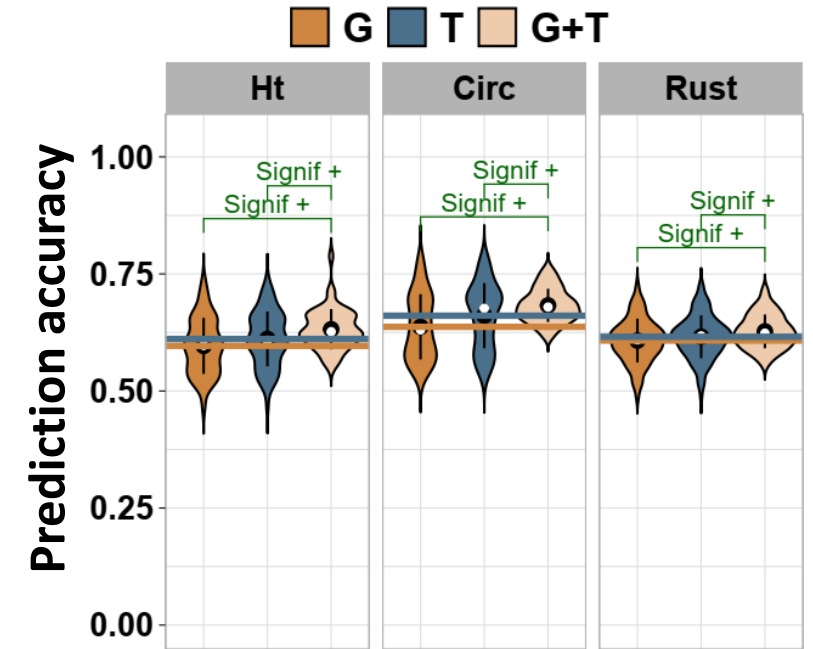
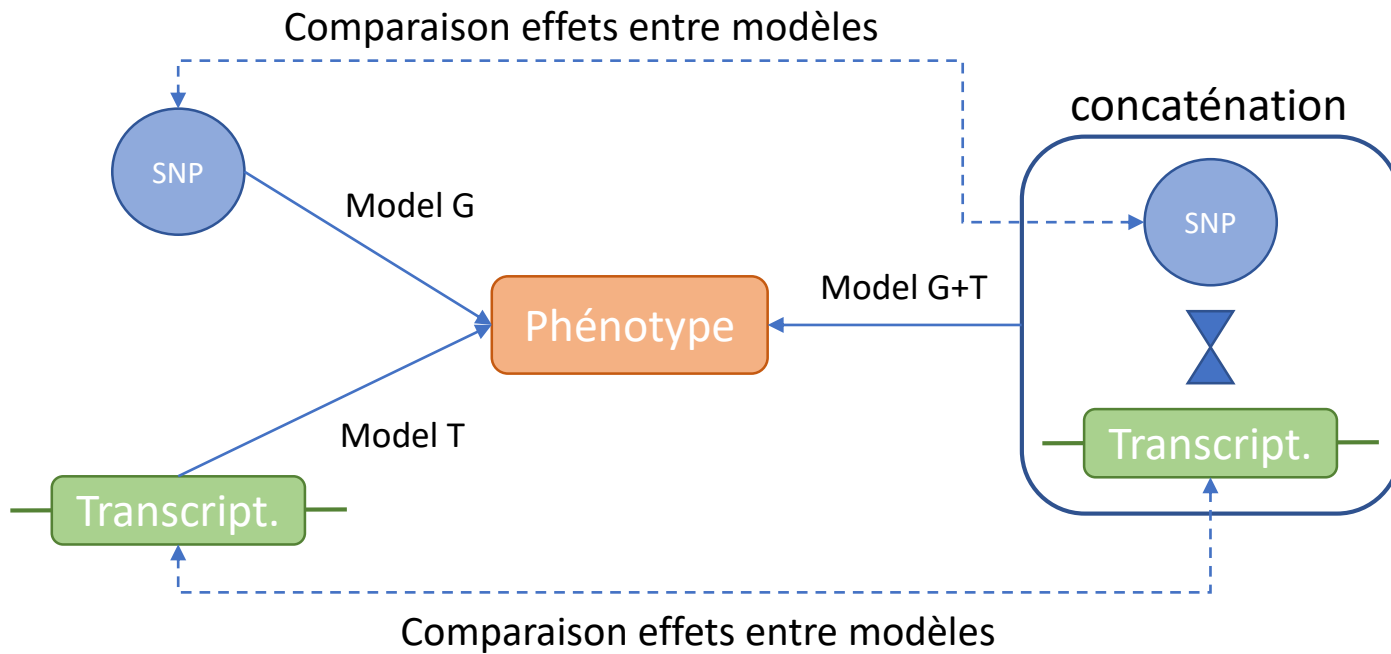


Interpréter le phénotype en fonction d'autres mécanismes génomiques sous-jacents



Liens entre transcrits et polymorphismes SNP



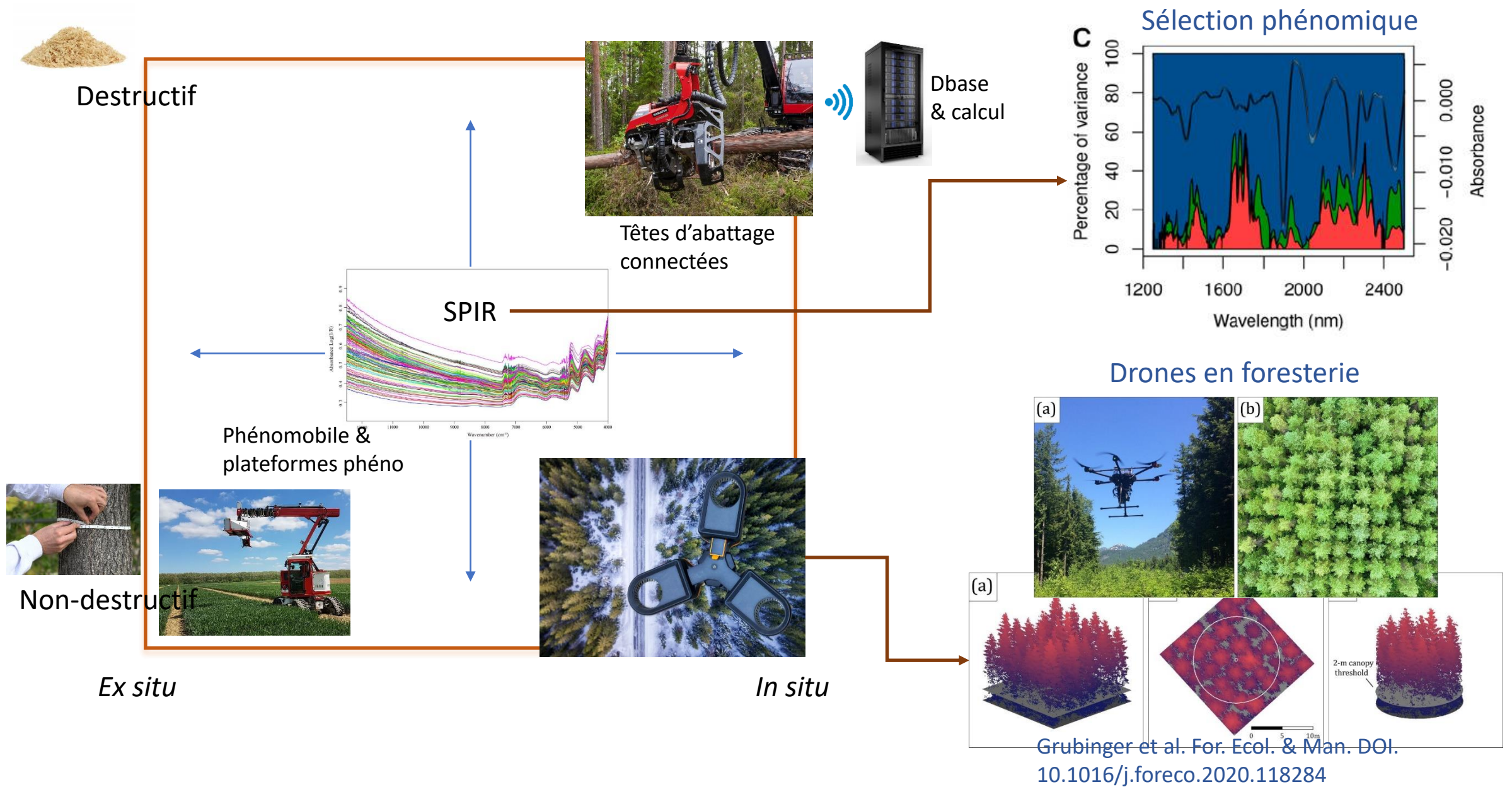


Conclusions :

- L'avantage de la concaténation varie selon les traits (pertinence des transcrits ? ...)
- La qualité de la prédiction fortement associée aux changements dans le classement des effets lorsque la concaténation a lieu.
- Pour les traits présentant le plus grand avantage avec concaténation, les changements dans les effets se sont produits pour les eQTL redondants. Pour les traits sans avantage, peu ou pas de changements dans les effets.
- La prise en compte des interactions entre « *omiques* » et leurs redondances est une étape essentielle pour améliorer la prédiction des phénotypes et gagner en explicabilité.

Facilitation et multi-dimensionnalité du phénotypage

Rincenc et al. G3. DOI.
10.1534/g3.118.200760



Développer la statistique spatiale en conditions forestières

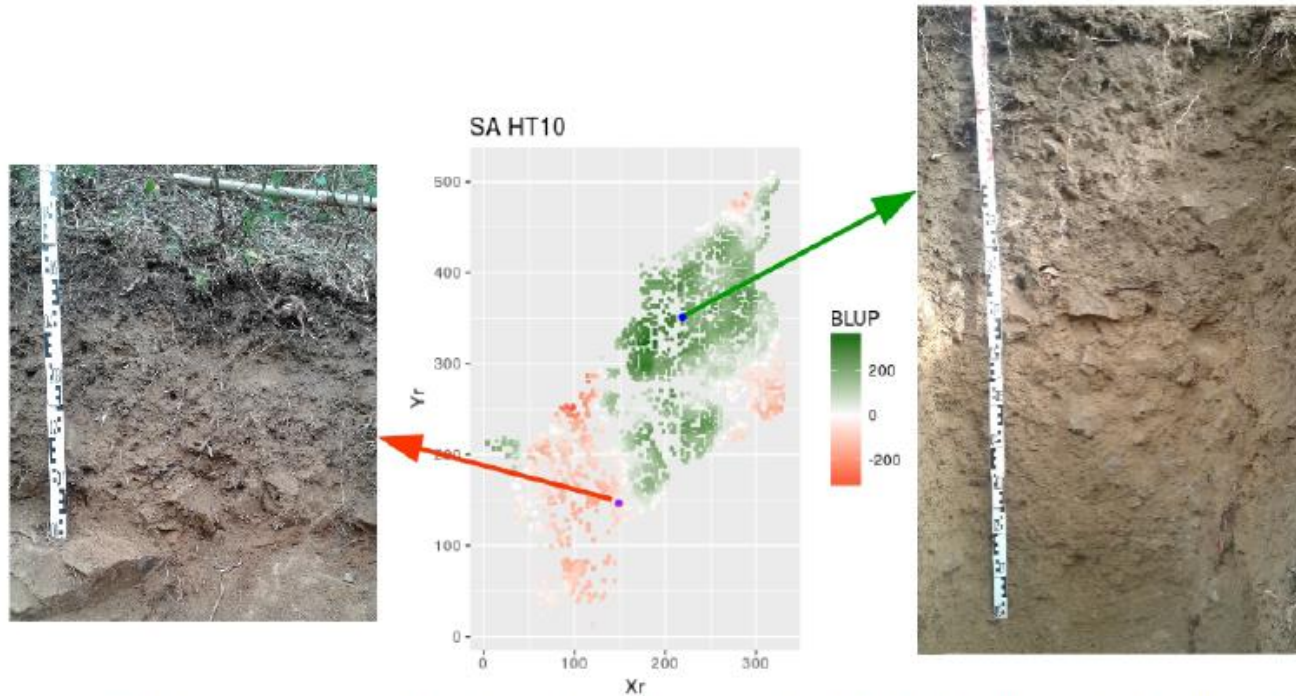
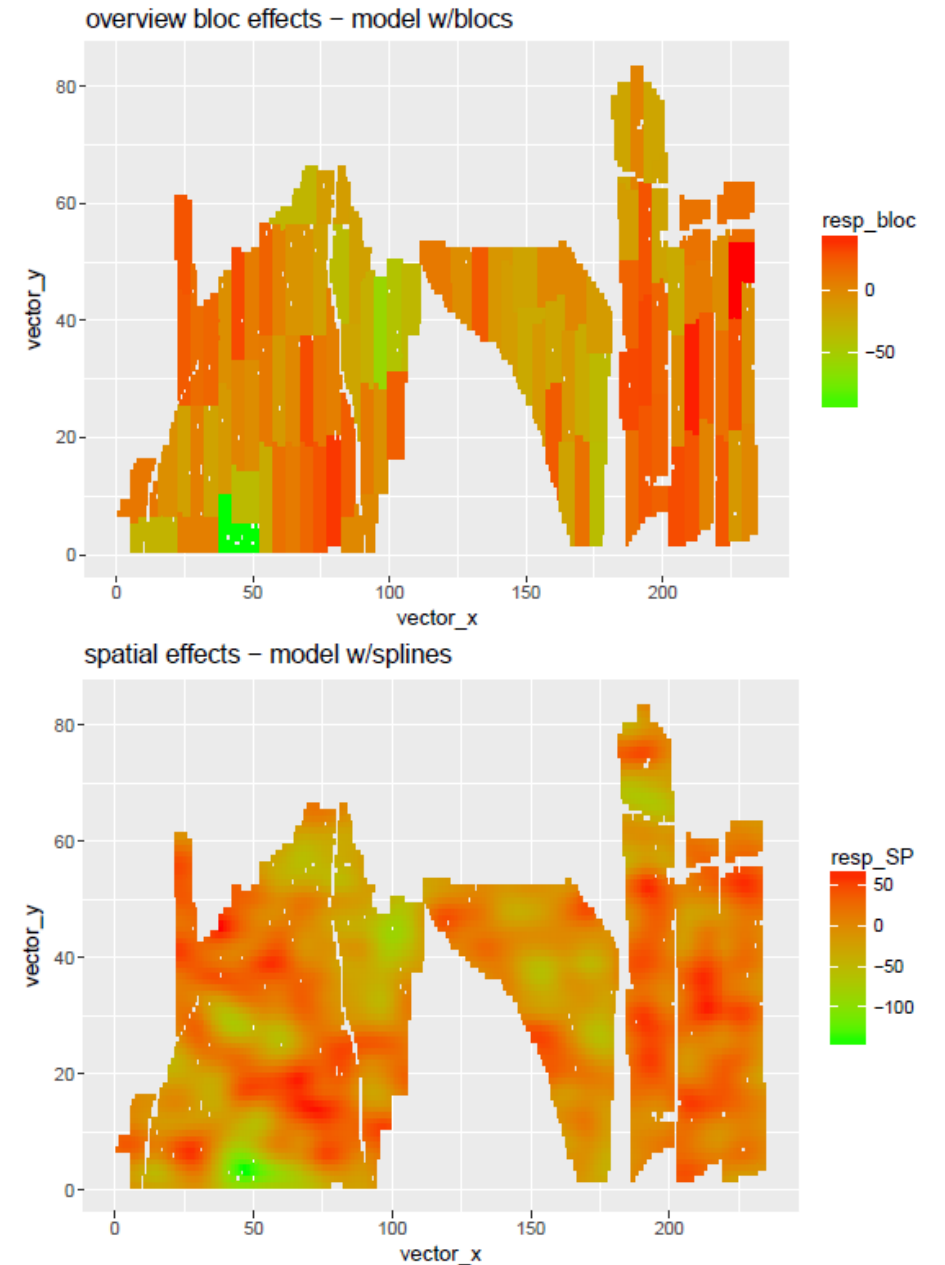


Figure 9: Pits excavated from Saint-Appolinaire (left and right) and position of the pits on the spatial effect map (center). The spatial effects are relative to the height in 2010 ('SA HT10'). 'BLUP' indicates that the spatial effects were estimated as best linear unbiased predictors. The scale indicates that a positive spatial effect on height was colored in green and a negative effect was colored in red.

Marchal 2017, thèse



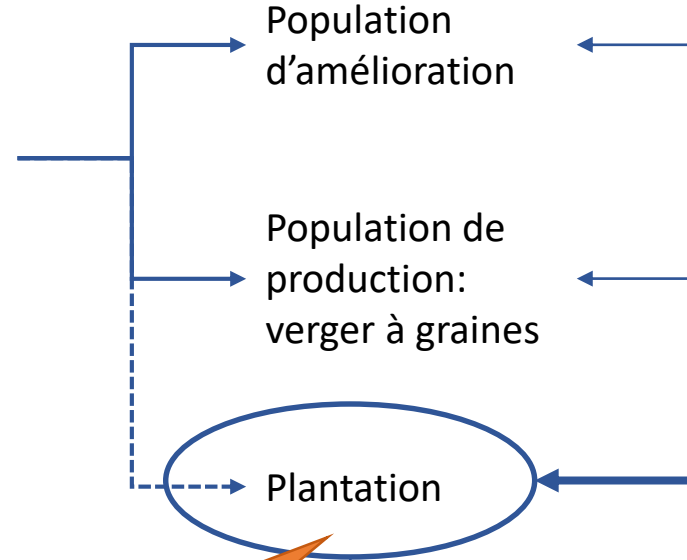
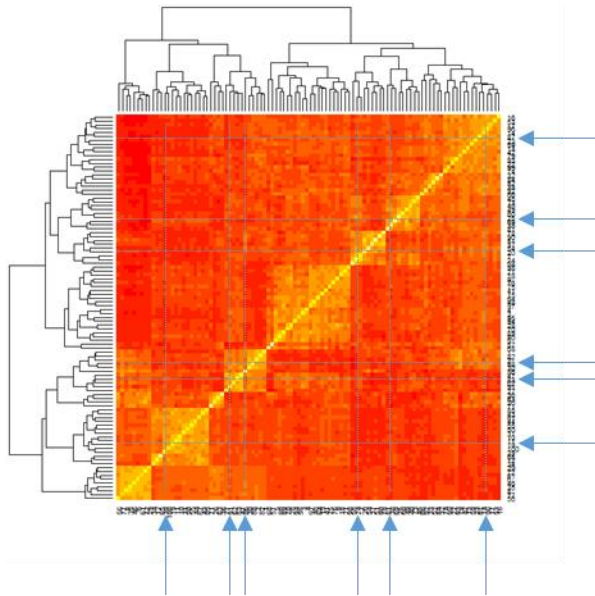
breedR outputs pour Douglas

Repenser la sélection,... la production, la plantation: sélection de groupe

Concept classique pour la diversité

Optimum contribution selection

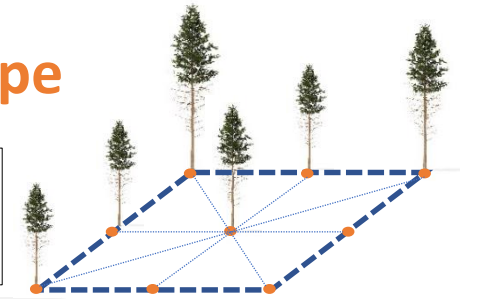
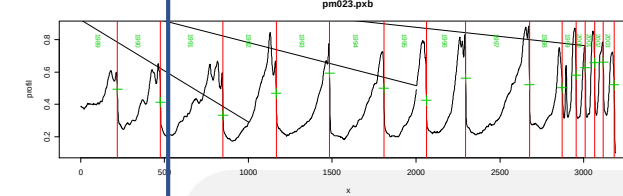
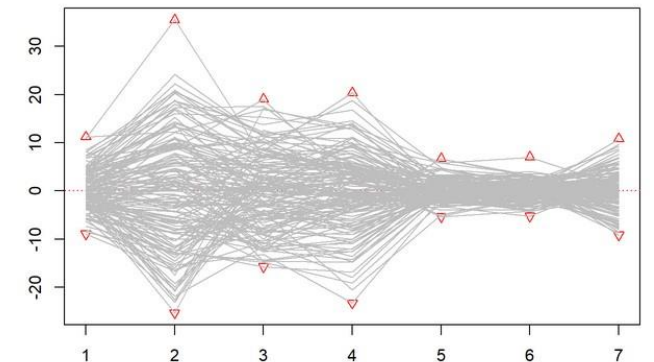
C_i = contributions of *selected* at time i
 $C_i'EBV_i$ = genetic gain at time $i + 1$
 $C_i'G_iC_i/2 = F$ at time $i + 1$
 $\text{Max}(C_i'EBV_i)$ at given increase in $C_i'G_iC_i$
 $\text{Min}(C_i'G_iC_i)$ at given levels of $C_i'EBV_i$



Challenges
environnementaux et
biotiques



Cocktail de résistances à la rouille



Compétition

Cappa et al. TGG. DOI.
10.1007/s11295-015-0917-3

Facilitation et multi-dimensionnalité du phénotypage

- Permettre l'approche systémique pour les caractères-fonction : numériser le phénomène
- Accélérer la caractérisation avec des mesures rapides, précises, plus facilement comparables et cumulables dans le temps et l'espace

Vers le phénotype systémique

- Développer une vision *systémique* dans l'étude des caractères, mieux comprendre le rôle des interactions GxE et les drivers environnementaux
- Asseoir une prédiction face aux changements environnementaux robuste et pertinente

Statistique spatiale

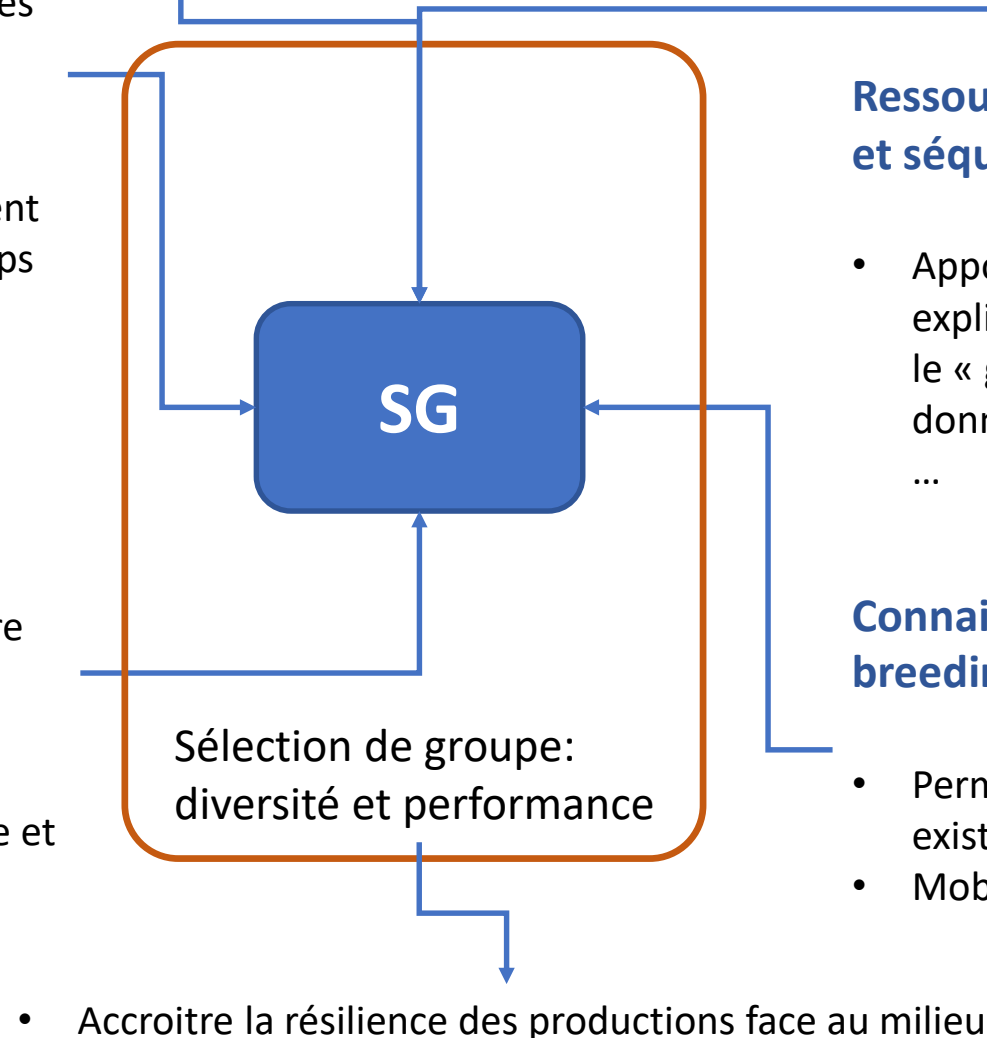
- Rendre plus facilement accessible et identifiable les signaux biologiques du phénomène dans les milieux forestiers
- Faciliter la caractérisation du milieu : identifier les facteurs micro-environnementaux sous-jacents au phénomène

Ressources génomiques pour génotypage et séquençage

- Apporter la « *matière de base* » pour expliquer les ressemblances phénotypiques : le « *gluant* » permettant l'intégration de données multiples, hétérogènes, dispersées, ...

Connaissance structure/architecture ~ pré-breeding

- Permettre une quantification de la diversité existante, distribution, rôle, risques
- Mobiliser les pools génétiques importants





*Biologie intégrée pour la
valorisation de la diversité des
arbres et de la forêt*



INRAE

